灌溉水矿化度和钠吸附比互作对膜下滴灌棉花生长及产量的影响

解玉彩[1,2,3]， 刘 浩[2,3]， 赵丰年[1,2]， 张 磊[1,2]，
赵 鑫[1,2]， 师 卓[1,2]， 王兴鹏[1,2,4,5,6]

（1. 塔里木大学水利与建筑工程学院，新疆 阿拉尔 843300；2. 中国农业科学院西部农业研究中心，新疆 昌吉 831100；3. 中国农业科学院农田灌溉研究所/农业农村部作物需水与调控重点开放实验室，河南 新乡 453002；4. 塔里木大学自治区教育厅普通高等学校现代农业工程重点实验室，新疆 阿拉尔 843300；5. 农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室，新疆 石河子 832000；6. 塔里木大学塔里木绿洲农业教育部重点实验室，新疆 阿拉尔 843300）

摘 要：为了缓解水资源供需矛盾，弥补淡水水资源的不足，利用微咸水和咸水灌溉成为了缓解用水危机的重要途径，同时在相同灌溉水矿化度下，灌溉水钠吸附比（SAR）的不同对棉花生长和产量的影响也会不同。因此，为了进一步探讨灌溉水矿化度和钠吸附比对棉花的影响，以棉花为研究对象，设计了3种不同灌溉水矿化度水平，分别为3 $g\cdot L^{-1}$（T3）、5 $g\cdot L^{-1}$（T5）和7 $g\cdot L^{-1}$（T7）；每种矿化度设计3种不同钠吸附比（SAR）水平，分别为10 $(mmol\cdot L^{-1})^{1/2}$（S10）、15 $(mmol\cdot L^{-1})^{1/2}$（S15）和20 $(mmol\cdot L^{-1})^{1/2}$（S20），并以当地淡水灌溉作为对照（CK），共10个处理，研究不同灌溉水矿化度和SAR组合对土壤盐分、棉花生长、植株离子积累、产量及水分利用效率的影响。结果表明：土壤盐分随着灌溉水矿化度或SAR的增加而增加，随着土壤深度的增加呈现先增加后降低的趋势；植株Na^+含量随着灌溉水矿化度或SAR的增加而增加，二者的交互作用对植株Na^+含量有极显著影响；而植株K^+含量、K^+/Na^+和N含量均随着灌溉水矿化度或SAR的增加而降低。株高、茎粗、叶面积指数和干物质量均随着灌溉水矿化度或钠吸附比的增加呈现下降趋势，灌溉水矿化度或钠吸附比极显著地抑制了干物质量的积累。灌溉水矿化度或SAR对单株铃数、单铃重、籽棉产量和耗水量（*ET*）有极显著影响，灌溉水SAR对水分利用效率（*WUE*）有极显著影响。与CK处理相比，T3S10的产量和*WUE*分别增加了3.27%和1.09%，T5S10的产量和*WUE*分别提高了2.54%和0.47%，T3S15的产量增加了1.18%，说明适度降低灌溉水SAR可以缓解矿化度增加导致棉花减产程度。不同矿化度和SAR灌溉水增加了棉花植株Na^+含量，降低了K^+和N营养的吸收，增大了K^+/Na^+，所以，棉花株高、茎粗、叶面积和干物质积累量随着灌溉水矿化度或SAR的增加逐渐降低。与CK处理相比，T3S10、T3S15、T5S10处理的单株铃数和单铃重增加。综上，当利用灌溉水矿化度为3 $g\cdot L^{-1}$，SAR<15 $(mmol\cdot L^{-1})^{1/2}$或灌溉水矿化度为5 $g\cdot L^{-1}$，SAR<10 $(mmol\cdot L^{-1})^{1/2}$的咸水进行灌溉时能保证棉花产量不受影响，研究结果可为新疆及其他干旱地区的水资源管理和农业可持续发展提供理论依据和数据支撑。

关键词：棉花；灌溉水；矿化度；钠吸附比；干物质积累量；产量；水分利用效率

新疆是我国最大的棉花生产基地，2023年新疆棉花产量为511.2×10^4 t，占全国棉花总产量的90.99%[1-2]。然而，南疆地区降雨稀少且蒸发量大[3]，随着塔里木河干流来水的减少，灌溉用水需求日趋增大[4]，水资源短缺成为了限制南疆地区棉花可持续发展的重要因素。南疆地区拥有丰富的咸水资源[5]，尤其是塔里木河两岸的水盐聚积区，土壤盐渍化程度相对较高，地下赋存大量苦咸水[6]。为了解

收稿日期：2024-03-26； **修订日期**：2024-09-27
基金项目：国家重点研发计划课题（2022YFD1900502）；国家自然科学基金面上项目（52479044）；第一师阿拉尔市财政科技计划项目（2024NY15）
作者简介：解玉彩（1995-），女，硕士研究生，主要从事作物高效用水理论与技术研究. E-mail: 17753206379@163.com
通讯作者：王兴鹏. E-mail: 13999068354@163.com

决水资源供需矛盾，弥补水资源的不足，用微咸水、咸水资源进行农业灌溉便成了增加灌溉水源以缓解水资源短缺危机的重要途径[7-8]。因此，合理利用微咸水进行农业灌溉对于缓解干旱地区水资源紧缺以及在极端干旱年份保障作物产量产生了一定的积极意义[9]。

学者们通过大量的理论与实际生产研究验证了咸水（微咸水）灌溉的可行性，并为不同区域不同情况下的咸水（微咸水）灌溉提供了理论基础和科学支撑[10-13]。咸水（微咸水）灌溉一方面提供了作物生长所需要的水分，另一方面也将盐分带入土壤，影响土壤的环境，不同的土壤环境为植株生长提供了差异化的生长条件[14]。以往学者关于咸水灌溉矿化度阈值的研究结果存在较大差异，张安琪[15]在河北研究发现，7 g·L^{-1}咸水滴灌未显著降低籽棉产量，但对土壤质量产生了一定负面影响。宋有玺等[16]在甘肃的试验研究表明，利用矿化度低于6 g·L^{-1}的微咸水膜下滴灌会促进棉花叶面积的生长，微咸水矿化度在2 g·L^{-1}水平时会促进棉花干物质的积累，当矿化度≥4 g·L^{-1}水平时，干物质的积累随灌水矿化度的增加明显受抑。Yang等[17]在北疆研究发现，使用3 g·L^{-1}的咸水进行灌溉可以提高棉花的产量和水分利用效率。以上咸水灌溉矿化度阈值不同的原因主要是气候条件、灌溉技术和灌溉水质等因素的差别引起的，因此，需要因地制宜展开研究。关于咸水灌溉对棉花的影响主要是针对矿化度对棉花生长和产量的影响，有大量咸水灌溉的研究在河北和北疆等地区进行，河北地区降雨丰富，对盐分有一定的淋洗作用；北疆地区冬季降雪融化后可以起到对土壤盐分淋洗作用。同时，不同生态类型区受气候、地质等条件差异的影响，咸水的离子组成差异较大[18-20]，灌溉农田后势必对土壤质量和作物生长产生影响。吴忠东等[21]通过土柱试验表明，使用钠吸附比较高的微咸水进行入渗时，Na^+的危害主要发生在土壤表层15 cm范围内；许尊秋等[22]研究发现，在新疆典型农区采用微咸水灌溉，只要灌溉水SAR≤30 (mmol·L^{-1})$^{1/2}$不会对土壤结构造成进一步破坏；但灌溉水离子组成差异对作物生长发育的作用机制认识不足，有待进一步探索。

因此，本研究以棉花为研究对象，采用灌溉水钠吸附比表征咸水离子组成，开展不同矿化度和钠吸附比组合的咸淡水混灌田间小区试验，探究灌溉水矿化度和钠吸附比互作对土壤盐分、棉花生长、植株离子积累、产量以及水分利用效率的影响，阐明棉花生长、产量和水分利用效率对不同矿化度和钠吸附比的响应，提出有利于棉花稳产的微咸水适宜灌溉水矿化度阈值及相应钠吸附比，以期为干旱地区灌溉水SAR对棉花的影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验于2023年4—10月在新疆阿拉尔现代农业综合试验站（81°17′56.52″E，40°32′36.90″N）进行。试验区属温带大陆性气候，年降水量18 mm左右，年平均气温14.49 ℃。土壤质地为砂壤土，0~100 cm土层容重为1.58 g·cm^{-3}，田间持水量为0.27 cm^3·cm^{-3}，地下水位平均埋深3 m左右。供试棉花于4月下旬播种，7月中旬打顶，采用机采棉种植模式，一膜三管六行，膜宽2.28 m，行距配置为10 cm+66 cm+10 cm+66 cm+10 cm，宽窄行机采棉配置，株距10 cm。滴灌带布置在两个边行的内侧和中间行的侧边，共三条滴灌带（图1）。

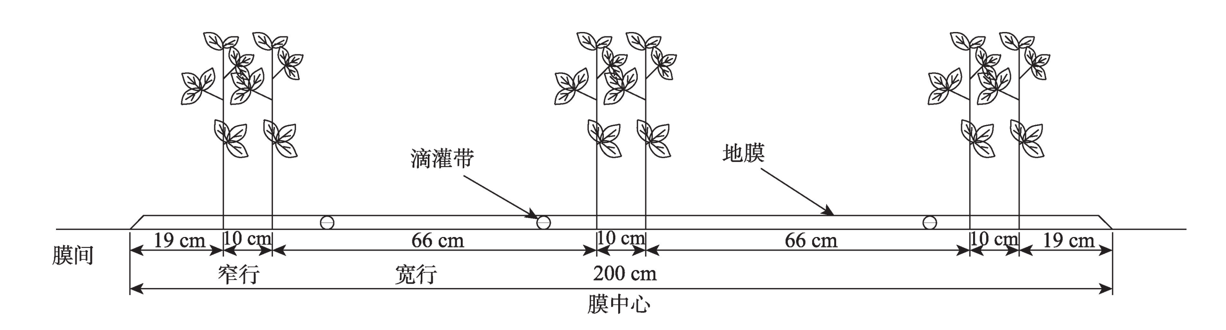


图1 棉花种植布置图

Fig. 1 Cotton planting layout

1.2 试验设计

棉花品种选择“塔河2号”，采用裂区试验设计，以灌溉水矿化度为主区设计了3种不同灌溉水矿化度水平，分别为3 g·L^{-1}（T3）、5 g·L^{-1}（T5）和7 g·L^{-1}（T7）；以灌溉水钠吸附比（SAR）为副区，设计3种不同钠吸附比（SAR）水平，分别为10（mmol·L^{-1}）$^{1/2}$（S10）、15（mmol·L^{-1}）$^{1/2}$（S15）和20（mmol·L^{-1}）$^{1/2}$（S20），并以当地淡水灌溉作为对照（CK），共10个处理，每个处理设置3个重复，共30个小区（6.48 m×7 m）。各处理编号及灌溉水不同离子含量见表1，不同灌溉水矿化度和钠吸附比以当地井水作为水源，通过添加NaCl和$CaCl_2$进行配置。为精确控制每个处理的灌水量，各处理均单独采用由混合罐、压力表、水表、阀门和小型自吸泵组成的滴灌系统供水（图2）。灌水时首先将当地井水通过地面管连接阀门，阀门的另一端连接软管进入混合罐；当水表显示足够水量时，关闭阀门，并将NaCl和$CaCl_2$加入混合罐后搅拌均匀；打开灌入大田水的阀门，将小型自吸泵插入电源并调整工作压力为0.1 MPa，滴头额定流量为3 L·h^{-1}。将灌溉水通过PVC硬管连接滴灌带注入每个小区里，直至桶内所有灌溉水用完为止。

试验根据作物蒸发蒸腾量（ET_c）指导灌水，参考作物需水量（ET_0）采用FAO-56修正并推荐的单作物系数法计算，棉花作物系数根据课题组2021年和2022年试验数据计算得到，其中蕾期和花铃期平均ET_a/ET_0（ET_a为作物耗水量）分别为0.77和1.14[23]。灌水周期为7 d，全生育期灌水11次，并且所有处理的灌水定额一致。施肥按照当地常规施肥制度（表2），耕地前撒施84 kg·hm^{-2}纯N作为底肥，每次灌水随水施加N、P和K肥，施肥量根据当地大田常规施肥量进行计算，与大田常规施肥保持一致。

1.3 测定项目

1.3.1 土壤盐分　采用烘干法进行土壤盐分的测定，在棉花花铃后期进行土壤样品采集。在垂直方向上，用土钻对距离地表0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm土壤进行取土。将烘干土碾碎，取经过1 mm筛网筛选的土样20 g于三角瓶中，加入100 mL蒸馏水，震荡5 min，静置15 min，用滤纸过滤，制成水土质量比例5:1的土壤水浸提液。用DDSJ-308A型（上海仪电）便携式电导率仪测定浸提液电导率。

1.3.2 植株离子及养分　在花铃后期，每个处理随机选择3株大小均匀的植株，按茎、叶和蕾铃分离，测定植株各器官的K^+、Na^+和N含量，植株K^+、Na^+和N采用浓硫酸-双氧水联合消煮，全N含量的测定使用AA3流动分析仪（AA3，Germany），用火焰光度计法测K^+和Na^+[24]。

1.3.3 生长发育指标　包括株高、茎粗、叶面积，在花铃后期，每个处理下随机选取3株长势一致的棉花测定棉花的株高、茎粗、叶面积。株高用直尺测量，测量位置为根基部到茎顶端生长点的自然高度；茎粗采用十字交叉法，在地上2 cm处用游标卡尺测量；叶面积=叶长×叶宽×折算系数，其中折算系数为0.75[25]。然后，根据叶面积及种植密度计算叶面积指数LAI。干物质：在花铃后期，每个处理随机选择3棵大小均匀的植株，将植株按器官分为茎、叶、蕾铃，分别在105 ℃的烘箱杀青30 min，然后在75 ℃条件下烘干至恒重后进行称重。

表1　各处理灌溉用水的矿化度、SAR和主要离子含量

Tab. 1　Mineralization, SAR and major ion content of irrigation water by treatment

处理	SAR/（mmol·L^{-1}）$^{1/2}$	矿化度/（g·L^{-1}）	主要离子含量/（mg·L^{-1}）					
			Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}
CK	8.74	1.44	103.60	42.07	419.09	6.45	648.10	87.54
T3S10	10.10	3.00	356.69	42.07	759.08	6.45	1616.02	87.54
T3S15	15.10	3.00	209.40	42.07	918.27	6.45	1604.10	87.54
T3S20	20.11	3.00	121.78	42.07	1013.00	6.45	1597.01	87.54
T5S10	10.11	5.00	789.42	42.07	1077.46	6.45	2864.91	87.54
T5S15	15.08	5.00	536.00	42.07	1350.00	6.45	2844.47	87.54
T5S20	20.11	5.00	368.69	42.07	1532.23	6.45	2830.87	87.54
T7S10	10.10	7.00	1269.42	42.07	1344.74	6.45	4117.63	87.54
T7S15	15.14	7.00	914.87	42.07	1727.97	6.45	4088.95	87.54
T7S20	20.11	7.00	671.24	42.07	1991.32	6.45	4069.24	87.54



图2 灌水装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of water filling device

表2 2023年棉花生育期灌溉施肥制度

Tab. 2 Irrigation and fertilisation regime for cotton fertility in 2023

灌水日期	灌水定额/mm	施肥量		
		N/(kg·hm⁻²)	P/(kg·hm⁻²)	K/(kg·hm⁻²)
6月15日	37.5	20.70	0.00	0.00
6月22日	36.48	13.80	9.00	4.80
6月29日	34.89	20.70	13.50	9.60
7月6日	38.49	34.50	22.50	9.60
7月13日	41.22	27.60	18.00	9.60
7月20日	43.95	27.60	13.50	24.00
7月27日	38.27	20.70	9.00	24.00
8月3日	42.45	13.80	9.00	19.20
8月10日	43.14	13.80	9.00	14.40
8月17日	37.37	13.80	9.00	4.80
8月24日	26.36	0.00	0.00	0.00
灌水总量和施肥量	420.12	207.00	112.50	120.00

1.3.4 产量 在棉花吐絮率超过80%时进行测产，测产时在各小区随机挑选3个2.28 m×2.9 m大小的样方，称量吐絮籽棉产量以及在各处理测产小区随机摘取100个棉铃的籽棉测量百铃质量，并记录采摘铃数、剩余铃数、株数，余铃按照0.75倍单铃质量计算理论总产量[26]。

1.3.5 耗水量与水分利用效率 棉田耗水量采用水量平衡公式[27]计算：

$$ET = I + U - D + P + (W_0 - W_t) \tag{1}$$

式中：I为灌水量(mm)；U为地下水补给量；D为深层渗漏量；P为有效降雨量(mm)；W_0和W_t分别为时段初和时段末80 cm土层内的土壤储水量。

水分利用效率按下式[28]计算：

$$WUE = 0.1y/ET \tag{2}$$

式中：WUE为水分利用效率(kg·m^{-3})；y为单位面积籽棉产量(kg·hm^{-2})；ET为作物耗水量(mm)；0.1为单位换算系数。

1.4 数据统计与分析

采用Micosoft Excel 2019进行数据处理，运用SPSS 27进行方差分析和差异显著性分析，用Oriain 2021软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 咸水灌溉对土壤盐分的影响

由图3可知，土壤盐分随着灌溉水矿化度或钠吸附比(SAR)的增加而逐渐增加；土壤盐分随着土壤深度的增加呈现先增加后减小的趋势，在60 cm达到最大。在灌溉水矿化度为3 g·L^{-1}时，与CK处理相比，T3S10、T3S15和T3S20处理的0~100 cm平均土壤盐分分别增加了2.86%、15.78%和42.84%；在灌溉水矿化度为5 g·L^{-1}时，与CK处理相比，T5S10、T5S15和T5S20处理的0~100 cm平均土壤盐分分别增加了21.53%、47.27%和59.19%；在灌溉水

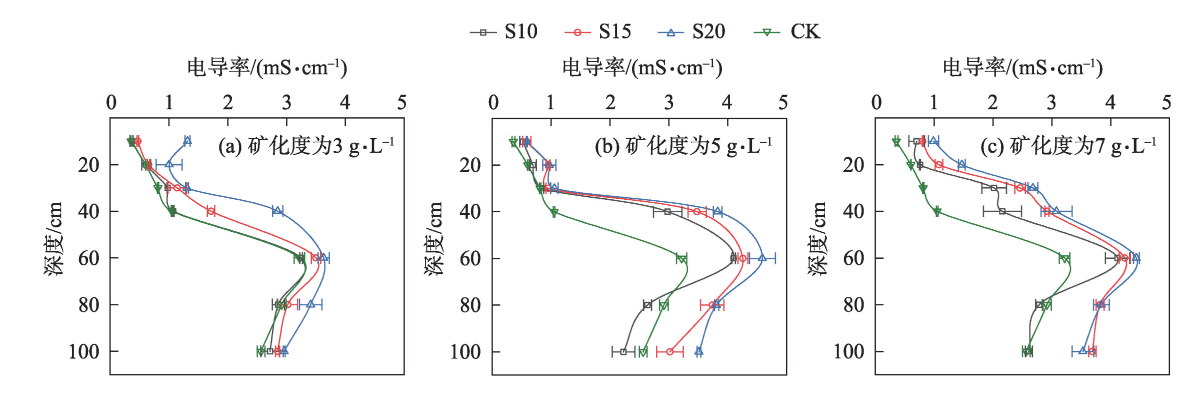


图3 灌溉水矿化度和钠吸附比对土壤盐分的影响

Fig. 3 Effect of irrigation water mineralisation and sodium adsorption ratio on soil salinity

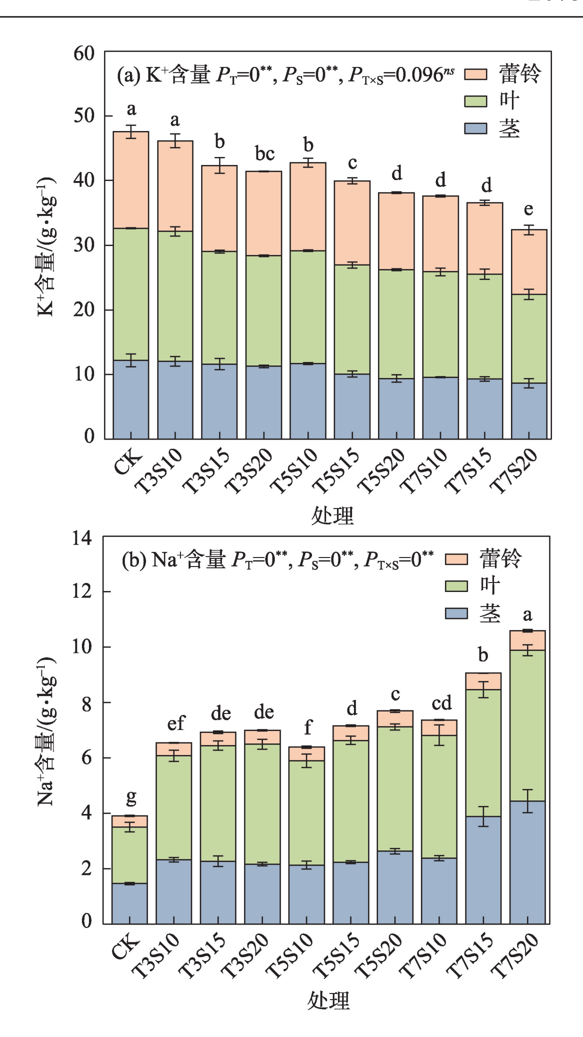
矿化度为7 g·L⁻¹时，与CK处理相比，T7S10、T7S15和T7S20处理的0~100 cm平均土壤盐分分别增加了31.42%、64.84%和73.57%。

2.2 咸水灌溉对植株离子及养分的影响

2.2.1 咸水灌溉对植株 K^+、Na^+ 的影响　由图4a可知，不同灌溉水矿化度或SAR对植株 K^+ 含量有极显著影响，但二者的交互作用对植株 K^+ 含量并无影响。在同一灌溉水矿化度条件下，植株 K^+ 含量随着灌溉水SAR的增加而逐渐减小，与CK处理相比，S10、S15和S20的平均植株 K^+ 含量分别显著降低了11.32%、16.69%和31.90%。在同一灌溉水SAR条件下，植株 K^+ 含量随着灌溉水矿化度的增加而逐渐减小，与CK处理相比，T3、T5和T7的平均植株 K^+ 含量分别显著降低了8.95%、15.29%和25.31%。从图4a可以得出，各器官中 K^+ 含量的大小为：叶>蕾铃>茎，说明植株 K^+ 主要在叶片中积累。

由图4b可知，灌溉水矿化度、SAR以及二者的交互作用均对植株 Na^+ 含量有极显著影响。在同一灌溉水矿化度条件下，植株 Na^+ 含量随着灌溉水SAR的增加而增加，与CK处理相比，S10、S15和S20的平均植株 Na^+ 含量分别显著增加了25.40%、33.81%和47.65%。在同一灌溉水SAR条件下，植株 Na^+ 含量随着灌溉水矿化度的增加而增加，与CK处理相比，T3、T5和T7的平均植株 Na^+ 含量分别显著增加了20.29%、32.97%和53.60%。与T3S20处理相比，T5S10植株 Na^+ 含量显著降低1.55%，说明在灌溉水矿化度为5 g·L⁻¹时，降低灌溉水的SAR会降低植株 Na^+ 含量。从图4b还可以看出，各器官中 Na^+ 含量的大小为：叶>茎>蕾铃，其中蕾铃中 Na^+ 含量相比茎和叶器官其含量较小。

2.2.2 咸水灌溉对植株 K^+、Na^+ 比值的影响　由图5可知，不同灌溉水矿化度或SAR对植株 K^+/Na^+ 比值有极显著影响，但二者的交互作用对植株 K^+/Na^+ 比值并无影响。在同一灌溉水矿化度条件下，随着灌溉水SAR的增加，植株 K^+/Na^+ 比值呈降低趋势，S10、S15和S20的平均植株 K^+/Na^+ 比值较CK处理分别显著降低了35.47%、43.33%和50.70%。在同一灌溉水SAR条件下，随着灌溉水矿化度的增加，植株 K^+/Na^+ 比值呈降低趋势，T3、T5和T7的平均植株 K^+/Na^+ 比值较CK处理分别显著降低了32.15%、40.71%和56.64%。从图5还可以看出，各器官中 K^+/Na^+ 的大小为：蕾铃>茎>叶。



注：不同小写字母表示在0.05水平差异显著；*和**分别代表 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上差异显著；*ns* 表示差异不显著。下同。

图4　灌溉水矿化度和钠吸附比对植株 K^+ 和 Na^+ 含量的影响

Fig. 4　Effect of irrigation water mineralisation and sodium adsorption ratio on plant K^+ and Na^+ content

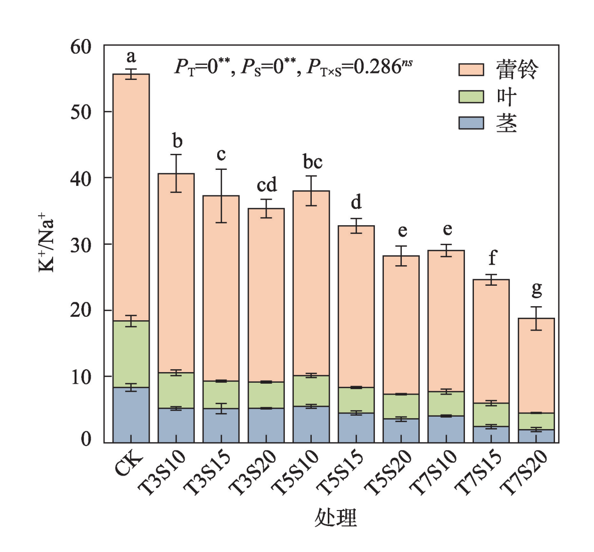


图5　灌溉水矿化度和钠吸附比对 K^+、Na^+ 比值的影响

Fig. 5　Effect of irrigation water mineralisation and sodium adsorption ratio on K^+, Na^+ ratio

2.2.3 咸水灌溉对植株N含量的影响 由图6可知，不同灌溉水矿化度或SAR对植株N含量有极显著影响，但二者的交互作用对植株N含量并无影响。在同一灌溉水矿化度条件下，植株N含量随着灌溉水SAR的增加而降低，与CK处理相比，S10、S15和S20的平均植株N含量分别显著降低了10.75%、16.16%和21.07%。在同一灌溉水SAR条件下，植株N含量随着灌溉水矿化度的增加而降低，与CK处理相比，T3、T5和T7的平均植株N含量分别显著降低了10.11%、15.39%和22.47%。与T3S20处理相比，T5S10处理的植株N含量显著升高4.29%；与T5S20处理相比，T7S10处理的植株N含量显著升高5.28%，说明虽然灌溉水矿化度提高了，但是降低灌溉水SAR不会降低植株N含量。从图6还可以看出，各器官中N含量的大小为：叶>蕾铃>茎，其中茎中N含量相比蕾铃和叶器官含量较小。在同一灌溉水矿化度条件下，茎秆N含量随着灌溉水SAR的增加而降低；在同一灌溉水SAR条件下，茎中N含量随着灌溉水矿化度的增加而降低。T7S20处理较CK处理茎中N含量显著降低9.12%，其余处理均较CK茎中N含量升高。

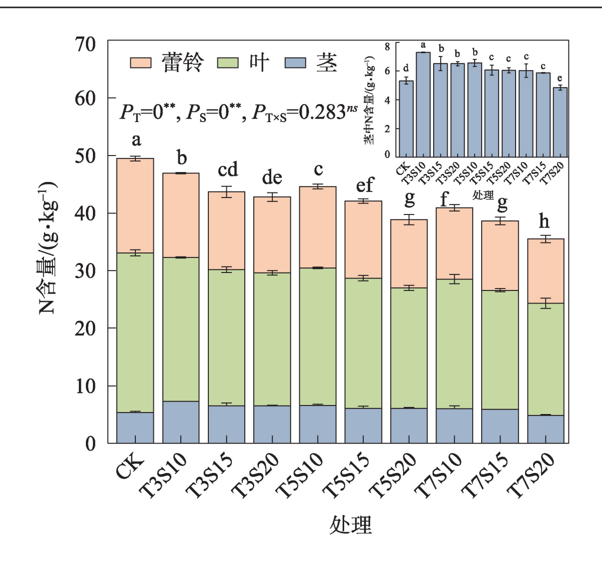


图6 灌溉水矿化度和钠吸附比对植株N含量的影响

Fig. 6 Effect of irrigation water mineralisation and sodium adsorption ratio on plant N content

2.3 咸水灌溉对棉花生长发育的影响

2.3.1 咸水灌溉对棉花株高、茎粗及叶面积指数的影响 由图7可知，不同灌溉水矿化度或SAR对棉花株高、茎粗和叶面积指数有极显著影响，而二者的交互作用对株高有极显著影响，对茎粗和叶面积指数没有影响。在同一灌溉水矿化度条件下，株高、茎粗和叶面积指数随着灌溉水SAR的增加而逐渐降低，与CK处理相比，S10、S15和S20的平均株高分别显著降低了19.07%、26.99%和28.73%。在同一灌溉水SAR条件下，株高、茎粗和叶面积指数随着灌溉水矿化度的增加而逐渐降低。与CK处理相比，T3、T5和T7的平均株高分别显著降低了16.9%、24.1%和33.8%。从图7中还可以看出，T3S10处理较CK处理的茎粗显著升高7%，说明低矿化度和低SAR条件下棉花植株的茎粗得到提高；T3S20、T5S10、T5S15处理与CK处理间茎粗没有显著性差异，说明低矿化度条件下不会降低棉花植株的茎粗；T3S10、T5S10处理与CK处理间叶面积指数没有显著性差异，说明在低中矿化度下，降低灌溉水SAR不会影响棉花植株的叶面积指数。

2.3.2 咸水灌溉对棉花干物质累积的影响 由图8a可知，不同灌溉水矿化度或SAR及二者的交互作用对棉花地上部生物积累量有极显著影响，说明干物

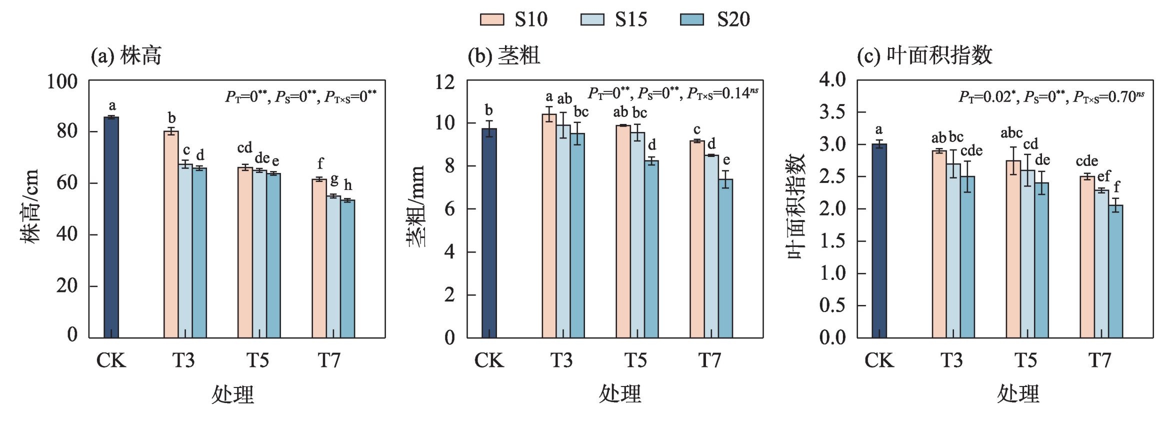


图7 灌溉水矿化度和钠吸附比对棉花生长的影响

Fig. 7 Effect of irrigation water mineralisation and sodium adsorption ratio on the growth of cotton

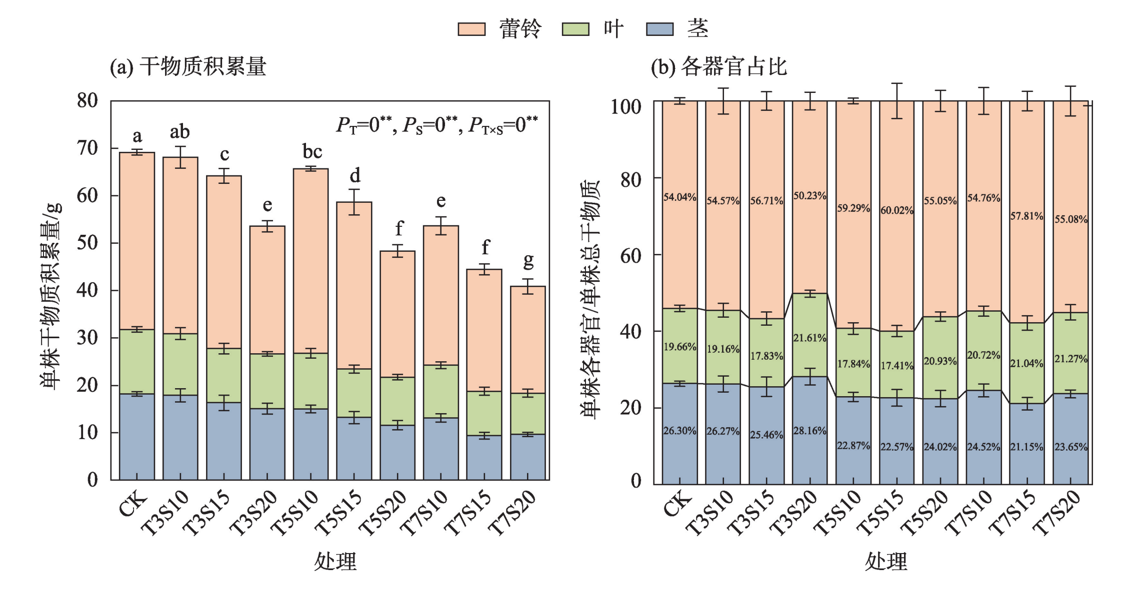


图8　灌溉水矿化度与钠吸附比对棉花干物质量积累与各器官占比的影响

Fig. 8　Effect of irrigation water mineralisation and sodium adsorption ratio on dry matter mass accumulation and percentage of each organ in cotton

质积累量不仅受灌溉水矿化度的影响,还受灌溉水离子影响的制约。在同一灌溉水矿化度条件下,棉花平均地上部生物积累量随着灌溉水SAR的增加而逐渐减小,与CK处理相比,S10、S15和S20的平均地上部生物积累量分别显著降低了9.64%、19.35%和31.67%。在同一灌溉水SAR条件下,平均地上部生物积累量随着灌溉水矿化度的增加而逐渐减小,与CK处理相比,T3、T5和T7的平均地上部生物积累量分别显著降低了10.42%、17.24%和33.01%。从图8a还可以看出,各器官干物质量的大小为:蕾铃>茎>叶,且各器官干物质量均随着灌溉水矿化度或SAR的增加逐渐降低。与T3S20处理相比,T5S10处理的地上部生物积累量显著升高了22.68%;与T5S20处理相比,T7S10处理的地上部生物积累量显著升高了13.34%,说明中高灌溉水矿化度条件下适度降低灌溉水SAR可以促进地上部生物积累量。由图8b可知,蕾铃/总干物质占比最高,说明花铃后期蕾铃是主要吸收营养的器官。

2.4 咸水灌溉对棉花产量及水分利用效率的影响

2.4.1　棉花产量　从表3可以看出,不同灌溉水矿化度或SAR及二者交互作用对收获密度无显著影响。灌溉水矿化度和SAR对单株铃数和单铃重有极显著影响,但二者的交互作用对单株铃数和单铃重没有影响。在相同灌溉水SAR条件下,单株铃数和单铃重随灌溉水矿化度的增大而降低;在相同灌溉水矿化度条件下,单株铃数和单铃重随灌溉水SAR的增大而降低。与CK处理相比,T3S10、T3S15、T5S10处理的单株铃数和单铃重分别升高了10.97%、2.74%、8.44%和0.92%、0.15%、0.61%,说明在中低灌溉水矿化度条件下,降低灌溉水SAR可提高单株铃数和单铃重。灌溉水矿化度和SAR对棉花籽棉产量有极显著影响,但二者的交互作用对棉花籽棉产量没有影响。在同一灌溉水矿化度条件下,籽棉产量随着灌溉水SAR增加而降低,与CK处理相比,S10、S15和S20的平均产量分别显著降低了2.17%、7.94%和19.04%;在同一灌溉水SAR条件下,籽棉产量随着灌溉水矿化度增加而降低,与CK处理相比,T3、T5和T7的平均产量分别显著降低了2.95%、8.51%和17.69%。从表3中还可以看出,CK处理与T3S10、T3S15和T5S10处理的籽棉产量无显著性差异。

2.4.2　*ET*(耗水量)　不同灌溉水矿化度或SAR以及二者的交互作用对*ET*有极显著影响(表3),在同一灌溉水矿化度条件下,*ET*随着灌溉水SAR增加而降低,与CK处理相比,S10、S15和S20的平均*ET*分别显著降低了1.57%、4.00%和9.95%;在同一灌溉水SAR条件下,*ET*随着灌溉水矿化度增加而降低,与CK处理相比,T3、T5和T7的平均*ET*分别显著降低了0.53%、4.41%和10.59%。

2.4.3　*WUE*(水分利用效率)　灌溉水SAR对*WUE*有极显著影响,但二者的交互作用对*WUE*没有影响。

表3 棉花产量构成与水分利用效率

Tab. 3 Cotton production and water use efficiency

处理	收获密度/(10^4株·hm^{-2})	单株铃数/个	单铃重/g	籽棉产量/($kg·hm^{-2}$)	*ET*/mm	*WUE*/($kg·m^{-3}$)
CK	19.73a	4.74cd	6.55a	6119.7a	415.62a	1.47ab
T3S10	19.31a	5.26a	6.61a	6319.6a	424.70a	1.49a
T3S15	19.44a	4.87bc	6.56a	6191.9a	421.60a	1.47ab
T3S20	19.48a	4.52de	6.15b	5305.8bcd	393.96b	1.35abc
T5S10	19.47a	5.14ab	6.59a	6274.9a	424.08a	1.48a
T5S15	19.80a	4.72cd	6.17b	5594.2b	397.58b	1.41abc
T5S20	20.06a	4.43e	5.85c	4928.2de	370.23c	1.33bc
T7S10	19.35a	4.69cde	6.08bc	5366.3bc	378.39c	1.42abc
T7S15	18.40a	4.63cde	6.06bc	5116.1cd	377.83c	1.35abc
T7S20	19.92a	4.09f	5.47d	4629.7e	358.57d	1.29c
T	*ns*	**	**	**	**	*ns*
S	*ns*	**	**	**	**	**
T×S	*ns*	*ns*	*ns*	*ns*	**	*ns*

注:T和S分别代表矿化度和钠吸附比,T×S代表矿化度与钠吸附比的交互作用。不同小写字母表示在0.05水平差异显著,*表示差异显著(P<0.05);**表示差异极显著(P<0.01);*ns*表示差异不显著。

在同一灌溉水矿化度条件下,与CK处理相比,S10、S15和S20的平均*WUE*分别显著降低了0.70%、4.22%和10.14%;在同一灌溉水SAR条件下,与CK处理相比,T3、T5和T7的平均*WUE*分别显著降低了2.56%、4.52%和7.98%。

3 讨论

利用咸水进行灌溉会把咸水中的盐分带入土壤,并在土壤中不断累积,影响植株离子及养分,尤其是Na^+对作物的影响较大,极容易造成植物的营养失衡[29]。K^+/Na^+是棉花耐盐能力的一个重要鉴定指标[30]。株高和茎粗是棉花生长发育的重要参数指标,棉花生长容易受到咸水灌溉的影响。叶面积指数是衡量棉花冠层结构是否合理的重要指标之一,合理的叶面积指数有利于提高光能利用率,减少漏光,从而提高产量[31]。本研究发现,土壤盐分随着灌溉水矿化度或SAR的增加而增加,但随着土壤深度增加呈现先增加后降低的趋势,这与王赫[32]研究结果一致。同时,植株K^+含量与K^+/Na^+均随着灌溉水矿化度或SAR增加而降低,植株Na^+含量随着灌溉水矿化度或SAR增加而增加,植株N含量随着灌溉水矿化度或SAR的增加呈现下降的趋势,这与江柱等[33]研究结果一致。主要原因可能是咸水灌溉导致了棉花排斥Na^+、吸收和运输K^+的能力降低,使得棉花Na^+增多,K^+含量降低,所以,K^+/Na^+也下降[34],而咸水灌溉会抑制棉花对养分的吸收,所以,株高、茎粗和叶面积均随着灌溉水矿化度或SAR的增加而降低,这与龚雨田等[35-38]研究结果一致。与CK处理相比,株高、茎粗和叶面积指数均降低,这与张安琪[15]研究结果不一致,可能是由于地区气候不同,降雨会加速盐分淋洗,新疆干旱极少降雨容易积盐。

本研究表明,植株各器官K^+和Na^+含量从多到少分别为:叶>蕾铃>茎和叶>茎>蕾铃,这与刘雪艳等[39]研究结果一致,由于叶片是进行光合作用的重要器官[40],灌溉水矿化度或者SAR增加使得干物质减少,影响作物的光合作用,K^+和Na^+通过茎运输到叶中并进行储存,所以,叶片中K^+和Na^+含量最多。各器官N含量从多到少为:叶>蕾铃>茎,这与闵伟[41]研究结果不一致,可能是由于测量植株N含量的时期不一样,本研究棉花叶片和蕾铃中的N元素含量最高,因为叶和蕾铃作为储存器官储存大量的氮素保证了棉花的营养生长和生殖生长[39]。从棉花茎中N元素含量来看,与CK处理相比,除了高矿化度高SAR(T7S20)对茎中N元素含量有抑制作用,其余处理均有增加作用,这说明少量的盐分胁迫阻碍了N从茎秆向叶片传输,所以N在茎秆中积累。在花铃后期各器官在总干物质量中的占比为:蕾铃>茎>叶,这是因为植株受到盐胁迫在棉花营养生长方面受到抑制,影响了棉花茎、叶、蕾铃干物质的分配占比。

研究还发现,单株铃数和单铃重随着灌溉水矿化度或SAR的增加而逐渐降低,造成这种结果的原因可能是咸水灌溉使棉花根部盐分浓度升高,过高时,棉花根系不能完全吸收水分,导致花铃期缩短,所以单株铃数和单铃重减少[42]。因为本研究中棉花种植密度均相同,故棉花籽棉产量构成主要由棉花的单株铃数和单铃重组成,所以棉花籽棉产量随着灌溉水矿化度或SAR的增加而降低。本研究中*ET*(耗水量)随着灌溉水矿化度或SAR的增加而降低,因为咸水灌溉会对作物产生盐分胁迫,会造成作物*ET*(耗水量)的降低[43-44]。水分利用效率是棉花生育期内水分吸收利用并进行产量转化的重要参数[45],由于棉花籽棉产量和*ET*均随着灌溉水矿化度或SAR的增加而逐渐降低,所以棉花*WUE*也随着灌溉水矿化度的增加而降低,这与毕言鹏[46]研究结果一致。T5S10处理较T3S20处理的植株Na^+含量显著降低,T5S10处理较T3S20处理的植株N含量显著升高,这是因为两个处理灌溉水中Na^+含量相差很小,虽然T3S20和T5S10处理都受到盐胁迫,但是T5S10处理灌溉水Ca^{2+}含量是T3S20处理的6.48倍,Ca^{2+}在保持植物膜结构和功能完整性[47]、稳定细胞壁结构[48],调节离子转运和选择性、控制离子交换行为以及细胞壁酶活性等过程中发挥着重要作用[49-50]。T5S10处理较T3S20处理的干物质量、单铃株数和单铃重显著升高,所以T5S10处理较T3S20处理的棉花籽棉产量显著升高。由于T5S10处理较T3S20处理的耗水量低,所以T5S10处理较T3S20处理的水分利用效率显著升高。本研究明确了灌溉水矿化度和钠吸附比互作对土壤盐分、植株离子积累、棉花生长、产量和水分利用效率的影响,但限于一季试验,微咸水灌溉的长期效应还有待于进一步研究确认。

4 结 论

本研究主要探讨了灌溉水矿化度与SAR互作对棉花生长及产量的影响,得出如下主要结论:

(1) 土壤盐分随着灌溉水矿化度或SAR增加而增加,其灌溉水矿化度为3 g·L^{-1},SAR为10 (mmol·L^{-1})$^{1/2}$较CK处理0~100 cm土壤盐分均值增幅最小为2.86%;土壤盐分随着土壤深度的增加呈现先增加后降低的趋势,并在60 cm达到最大。

(2) 灌溉水矿化度和SAR的增加抑制了对K^+和N素的吸收,显著降低了棉花株高、茎粗、叶面积和干物质积累量。随着灌溉水矿化度的增加,降低灌溉水SAR可以减轻对棉花生长的抑制作用。

(3) 确定了不影响棉花生长和产量的微咸水灌溉矿化度阈值,即当微咸水SAR<10(mmol·L^{-1})$^{1/2}$时,灌溉水矿化度应低于5 g·L^{-1};当SAR介于10~15(mmol·L^{-1})$^{1/2}$时,灌溉水矿化度应低于3 g·L^{-1}。

参考文献(References):

[1] 国家统计局关于2023年棉花产量的公告[N]. 中国信息报, 2023-12-26(001). [NSO Announcement on Cotton Production in 2023[N]. China Information Daily, 2023-12-26(001).]

[2] 孙加力. 政府政策与新疆棉花生产发展[D]. 北京: 中国农业大学, 2005. [Sun Jiali. Policy of Government and Development of Xinjiang Cotton Production[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005.]

[3] Wang R, Kang Y, Wan S, et al. Salt distribution and the growth of cotton under different drip irrigation regimes in a saline area[J]. Agricultural Water Management, 2011, 100(1): 58-69.

[4] 岳胜如, 王伦澈, 曹茜, 等. 塔里木河流域植被动态及潜在因素驱动机制[J]. 地球科学, 2024, 49(9): 3399-3410. [Yue Shengru, Wang Lunche, Cao Qian, et al. Vegetation dynamics and potential factors driving mechanisms in the Tarim River Basin[J]. Earth Science, 2024, 49(9): 3399-3410.]

[5] 俄有浩, 严平, 李文赞, 等. 中国内陆干旱、半干旱区苦咸水分布特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(2): 565-573. [E Youhao, Yan Ping, Li Wenzan, et al. Characteristics and distribution of brachish water in arid and semi-arid interior of China[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(2): 565-573.]

[6] 黄程琪. 新疆农业水资源利用效率及影响因素分析[D]. 石河子: 石河子大学, 2019. [Huang Chengqi. Analysis on Utilization Efficiency and Influencing Factors of Agricultural Water Resources in Xinjiang[D]. Shihezi: Shihezi University, 2019.]

[7] 李万精. 微咸水膜下滴灌棉田土壤水盐分布特征及数值模拟研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2022. [Li Wanjing. Distribution Characteristics and Numerical Simulation of Soil Water and Salt under Brackish Water of Drip Irrigation under Film in Cotton Field [D]. Shihezi: Shihezi University, 2022.]

[8] 郭晓雯, 刘佳炜, 郑志玉, 等. 全生育期咸水滴灌对土壤盐分累积和棉花生长的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1952-1965. [Guo Xiaowen, Liu Jiawei, Zheng Zhiyu, et al. Effects of saline water drip irrigation on soil salt accumulation and cotton growth during the whole growth period[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1952-1965.]

[9] 蒋静, 翟登攀, 张超波. 灌溉施肥水平对盐渍化农田水盐分布及玉米产量的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1207-1217. [Jiang Jing, Zhai Dengpan, Zhang Chaobo. Effects of irrigation and fertilizer levels on the distribution of water and salt in saline field

and maize yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1207-1217.]

[10] 韦开. 去电子微咸水膜下滴灌棉花生长特征及其调控方法[D]. 西安: 西安理工大学, 2023. [Wei Kai. Study on Cotton Growth Charcteristics and Regulation Method under Film-mulched Drip Irrigation with Ionized Brackish Water[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.]

[11] 雷杰. 不同矿化度水源膜下滴灌棉田盐分累积规律及作物生长模拟研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2023. [Lei Jie. Study on Salt Accumulation and Crop Growth Simulation of Drip Irrigation Cotton Field under Different Salinity Water Source Film[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023.]

[12] 张妮, 左强, 石建初, 等. ANSWER模型评估新疆咸水灌溉棉花产量与效益[J]. 农业工程学报, 2023, 39(2): 78-89. [Zhang Ni, Zuo Qiang, Shi Jianchu, et al. Estimating the yields and profits of saline water irrigated cotton in Xinjiang based on ANSWER model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(2): 78-79.]

[13] 赖虹雨, 吕德生, 朱艳, 等. 生物炭施加对微咸水滴灌棉田土壤水热盐及棉花生长的影响[J]. 干旱区研究, 2024, 41(2): 326-338. [Lai Hongyu, Lyu Desheng, Zhu Yan, et al. Effects of biochar application on soil hydrothermal salinity and cotton growth in brackish water drip irrigation cotton field[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(2): 326-338.]

[14] Kandiah A, Marshali A M, et al. The Use of Saline Waters for Crop Production[M]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992.

[15] 张安琪. 咸水膜下滴灌对土壤环境和棉花生长的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020. [Zhang Anqi. Effects of Film Mulched Drip Irrigation with Saline Water on Soil Environment and Cotton Growth[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2020.]

[16] 宋有玺, 安进强, 何岸镕, 等. 微咸水膜下滴灌对棉花生长发育及其产量的影响研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 128-132. [Song Youxi, An Jinqiang, He Anrong, et al. Study of mulched drip irrigation with saline water on cotton growth and yield[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 128-132.]

[17] Yang G, Li F, Tian L, et al. Soil physicochemical properties and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield under brackish water mulched drip irrigation[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 199: 104592.

[18] 谭帅. 微咸水膜下滴灌土壤盐调控与棉花生长特征研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018. [Tan Shuai. Study on Soil Water and Salt Regulation and Cotton Growth Characteristics under Film-mulched Drip Irrigation with Brackish Water[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.]

[19] 陈文岭. 微咸水膜下滴灌棉花根系—水—盐—微量元素相互作用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018. [Chen Wenling. Study on the Interactions of Cotton Root-soil Moisture-salinity-trace Element under Mulched Drip Irrigation with Brackish Water[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.]

[20] Zhang J P, Li K J, Zheng C L, et al. Cotton responses to saline water irrigation in the low plain around the Bohai Sea in China[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2018, 144(9): 04018027.

[21] 吴忠东, 王全九. 微咸水钠吸附比对土壤理化性质和入渗特性的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 231-236. [Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Study on impact of sodium adsorption ratio of saline water on soil physical and chemical properties and infiltration characteristics[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(1): 231-236.]

[22] 许尊秋, 陈阳, 毛晓敏. 钠吸附比和盐分浓度对新疆典型砂壤土物理性质的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(20): 86-95. [Xu Zunqiu, Chen Yang, Mao Xiaomin. Influences of salt adsorption ratio and salt concentration on the physical properties of typical sandy loam in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(20): 86-95.]

[23] 高福奎. 滴水春灌对南疆覆膜棉田水热盐分布及棉花生长的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2023. [Gao Fukui. Effects of Drip Spring Irrigation on Water-Heat-Salt Distribution and Cotton Growth in Mulched Cotton Fields in Southern Xinjiang[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2023.]

[24] 张一迪. 过量施用化肥对日光温室连作黄瓜植株和土壤钙素积累及变化的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023. [Zhang Yidi. Effects of Excessive Application of Chemical Fertilizer on Calcium Accumulation and Change in Continuous Cropping Cucumber Plants and Soils in Solar Greenhouse[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.]

[25] 李平, 张永江, 刘连涛, 等. 水分胁迫对棉花幼苗水分利用和光合特性的影响[J]. 棉花学报, 2014, 26(2): 113-121. [Li Ping, Zhang Yongjiang, Liu Liantao, et al. Effect of water stress on water utilization and leaf photosynthetic characteristics in cotton (*Gossypium hirsutum* L) seedlings[J]. Cotton Science, 2014, 26(2): 113-121.]

[26] 崔永生, 王峰, 孙景生, 等. 南疆机采棉田灌溉制度对土壤水盐变化和棉花产量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3634-3642. [Cui Yongsheng, Wang Feng, Sun Jingsheng, et al. Effects of irrigation regimes on the variation of soil water and salt and yield of mechanically harvested cotton in Southern Xinjiang, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(11): 3634-3642.]

[27] Plénet D, Mollier A, Pellerin S. Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency Ⅱ. Radiation-use efficiency, biomass accumulation and yield components[J]. Plant and Soil, 2000, 224(2): 259-272.

[28] Maddonni G A, Otegui M E, Cirilo A G. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation[J]. Field Crops Research, 2001, 71(3): 183-193.

[29] 郭仁松, 林涛, 徐海江, 等. 微咸水滴灌对绿洲棉田水盐运移特征及棉花产量的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 211-216. [Guo Rensong, Lin Tao, Xu Haijiang, et al. Effect of saline water drip irrigation on water and salt transport features and cotton yield of oasis cotton field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 211-216.]

[30] 王宁, 杨杰, 黄群, 等. 盐胁迫下棉花K^+和Na^+离子转运的耐盐性生理机制[J]. 棉花学报, 2015, 27(3): 208-215. [Wang Ning,

Yang Jie, Huang Qun, et al. Physiological salinity tolerance mechanism for transport of K^+ and Na^+ Ions in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seedlings under salt stress[J]. Cotton Science, 2015, 27(3): 208-215.]

[31] 王洪博, 曹辉, 高阳, 等. 南疆无膜滴灌棉花灌溉制度对土壤水分和产量品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(5): 26-34. [Wang Hongbo, Cao Hui, Gao Yang, et al. The effects of drip-irrigation scheduling without mulching on soil moisture, yield and quality of cotton in Southern Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(5): 26-34.]

[32] 王赫. 长期咸水灌溉对土壤水盐变化与棉花产量的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023. [Wang He. Impacts of Long-term Saline Water Irrigation on Sail Water-Salt Variation and Cotton Yield[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2023.]

[33] 江柱, 张江辉, 白云岗, 等. 膜下咸水滴灌水肥盐调控对棉花盐离子、养分吸收及干物质分配的影响[J].灌溉排水学报, 2022, 41(2): 59-67. [Jiang Zhu, Zhang Jianghui, Bai Yungang, et al. The impact of mulched drip fertigation with saline water on uptake of ions and nutrients by cotton[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(2): 59-67.]

[34] 张国伟. 土壤盐分影响棉花(*Gossypium hirsutum* L.)生长的生理机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011. [Zhang Guowei. Effects of Soil Salinity on Growth and Its Physiological Mechanism for Cotton (*Gossypium hirsutum* L.)[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.]

[35] 龚雨田, 孙书洪, 闫宏伟. 微咸水灌溉对冬小麦产量及农艺性状的影响[J]. 节水灌溉, 2017(9): 33-37, 42. [Gong Yutian, Sun Shuhong, Yan Hongwei. Study on the impact of saline water with different materialization degree on growth characteristics and yield of winter wheat[J]. Water Saving Irrigation, 2017(9): 33-37, 42.]

[36] 张勇, 毕远杰, 郭向红, 等. 不同生育期微咸水灌溉对玉米生长影响研究[J]. 节水灌溉, 2017(9): 43-46. [Zhang Yong, Bi Yuanjie, Guo Xianghong, et al. Effects of brackish water irrigation on the growth of maize in different growth periods[J]. Water Saving Irrigation, 2017(9): 43-46.]

[37] 王毅, 王久生, 李爱卓, 等. 微咸水膜下滴灌对绿洲棉花生长特征与产量的影响[J]. 节水灌溉, 2011(11): 25-27, 30. [Wang Yi, Wang Jiusheng, Li Aizhuo, et al. Influence of drip irrigation under film with brackish water on physiological characteristics and yield of oasis cotton in Xinjiang Tarim Basin[J]. Water Saving Irrigation, 2011(11): 25-27, 30.]

[38] 李莎. 咸水膜下滴灌对土壤水盐运移及棉花生长产量影响的试验研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2011. [Li Sha. Experimental Study on Effect of Drip Irrigation with Saltwater on the Soil Water and Salt Transport and the Growth and Yield of Cotton[D]. Shihezi: Shihezi University, 2011.]

[39] 刘雪艳, 丁邦新, 白云岗. 微咸水膜下滴灌对棉花植株盐分、养分吸收及品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 128-135. [Liu Xueyan, Ding Bangxin, Bai Yungang. Effects of drip irrigation with brackish water under film mulch on salinity, nutrients and quality of cotton plants[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 128-135.]

[40] 王允. 不同生育期水分亏缺对盆栽棉花生长发育的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016. [Wang Yun. Effects of Water Deficit at Different Growing Stage on Growth and Development Characteristics of Potted Cotton[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016.]

[41] 闵伟. 咸水滴灌对棉田土壤微生物及水氮利用效率的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2015. [Min Wei. Effect of Saline Water on Soil Microbe and Nitrogen-use Efficiency in Drip-irrigated Cotton Field[D]. Shihezi: Shihezi University, 2015.]

[42] 赖善星, 张耀珑, 盛统民, 等. 干旱区微咸水覆膜灌溉棉花根系生长分布与土壤水盐运移规律及其相互作用[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(6): 175-183. [Lai Shanxing, Zhang Yaolong, Sheng Tongmin, et al. Cotton root growth distribution and soil water-salt transport and their interaction under film-mulched irrigation with brackish water in arid region[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(6): 175-183.]

[43] 王庆明, 王永胜, 贾斌, 等. 咸水非充分灌溉对春小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(2): 66-68. [Wang Qingming, Wang Yongsheng, Jia Bin, et al. Effect of non-sufficient irrigation with saline water on spring wheat yield, water use efficiency[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(2): 66-68.]

[44] 袁成福, 冯绍元. 咸水非充分灌溉下制种玉米水分利用效率研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(10): 137-141. [Yuan Chengfu, Feng Shaoyuan. Research on water use efficiency of seed maize under deficit irrigation with saline water[J]. Yellow River, 2017, 39(10): 137-141.]

[45] 韩美琪, 王振华, 朱艳, 等. 加气对西北旱区膜下滴灌棉花光合及水分利用效率的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(1): 64-70. [Han Meiqi, Wang Zhenhua, Zhu Yan, et al. Effects of aeration on photosynthesis and water use efficiency of cotton under mulched drip irrigation in arid area of Northwest China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42(1): 64-70.]

[46] 毕言鹏. 咸水沟灌对土壤理化性质和棉花产量的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022. [Bi Yanpeng. Effects of Saline-water Furrow Irrigation on Soil Physicochemical Properties and Cotton Yield[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022.]

[47] Tuna A L, Kaya C, Ashraf M, et al. The effects of calcium sulphate on growth, membrane stability and nutrient uptake of tomato plants grown under salt stress[J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, 59(2): 173-178.

[48] Neves-Piestun B G, Bernstein N. Salinity-induced inhibition of leaf elongation in maize is not mediated by changes in cell wall acidification capacity[J]. Plant Physiology, 2001, 125(3): 1419-1428.

[49] Zhao M G, Tian Q Y, Zhang W H. Nitric oxide synthase-dependent nitric oxide production is associated with salt tolerance in Arabidopsis[J]. Plant physiology, 2007, 144(1): 206-217.

[50] Ashraf M, Harris P J C. Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants[J]. Plant Science, 2004, 166(1): 3-16.

Effects of irrigation water mineralization and sodium adsorption ratio on the growth and yield of drip-irrigated cotton under film

XIE Yucai[1,2,3], LIU Hao[2,3], ZHAO Fengnian[1,2], ZHANG Lei[1,2],
ZHAO Xin[1,2], SHI Zhuo[1,2], WANG Xingpeng[1,2,4,5,6]

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Tarim University, Aral 843300, Xinjiang, China;
2. West Agricultural Research Center, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changji 831100, Xinjiang, China;
3. Institute of Farmland Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Water Requirement and Regulation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xinxiang 453002, Henan, China;
4. Modern Agricultural Engineering Key Laboratory at Universities of Education Department of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Tarim University, Aral 843300, Xinjiang, China; 5. Key Laboratory of Northwest Oasis Water-Saving Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 6. Key Laboratory of Tarim Oasis Agriculture, Ministry of Education, Tarim University, Aral 843300, Xinjiang, China)

Abstract: To address the imbalance between the supply and demand of water resources and compensate for the shortage of freshwater resources, the use of brackish and saline water for irrigation has become crucial. Simultaneously, the effects of different sodium adsorption ratios (SAR) on cotton growth and yield can vary under the same degree of mineralization in irrigation water. Therefore, to further explore the effects of irrigation water mineralization and SAR on cotton, we established three mineralization treatments at 3 $g \cdot L^{-1}$(T3), 5 $g \cdot L^{-1}$(T5), and 7 $g \cdot L^{-1}$(T7). Additionally, we designed three SAR treatments at 10 $(mmol \cdot L)^{1/2}$(S10), 15 $(mmol \cdot L)^{1/2}$(S15), and 20 $(mmol \cdot L)^{1/2}$(S20). Local freshwater irrigation served as a control (CK). In total, 10 treatments were conducted in this experiment to examine the combined effects of irrigation water mineralization and SAR costress on soil salinity, cotton growth, plant ion accumulation, yield, and water use efficiency. The results indicated that soil salinity increased with higher irrigation water mineralization or SAR, initially rising before decreasing with increasing soil depth. Plant Na^+ content increased with increasing irrigation water mineralization or SAR, with the interaction effect between these factors being highly significant. Conversely, plant K^+, K^+/Na^+, and N content decreased as irrigation water mineralization or SAR increased. Additionally, plant height, stem thickness, leaf area index, and dry matter mass all showed a significant decreasing trend with increased irrigation water mineralization and SAR, with significant inhibition of dry matter accumulation observed. Irrigation water mineralization and SAR significantly affected the number of bolls per plant, boll weight, seed cotton yield, and water consumption (*ET*). Moreover, irrigation water SAR significantly affected water use efficiency (*WUE*). Compared to the CK treatment, yield and *WUE* increased by 3.27% and 1.09% in T3S10, 2.54% and 0.47% in T5S10, and 1.18% in T3S15, respectively. This increase indicated that moderately reducing the irrigation water SAR can help mitigate yield reduction in cotton due to increased mineralization. Different levels of mineralization and SAR in irrigation water increased the Na^+ content in cotton plants while reduced K^+ and N nutrient uptake, and increased the K^+/Na^+ ratio. Consequently, cotton plant height, stem thickness, leaf area, and dry matter accumulation gradually decreased as irrigation water mineralization or SAR increased. The number of bolls per plant and boll weight increased in the T3S10, T3S15, and T5S10 treatments compared to the CK treatment. In conclusion, using brackish water with an irrigation water mineralization of 3 $g \cdot L^{-1}$ and SAR below 15 $(mmol \cdot L^{-1})^{1/2}$, or an irrigation water mineralization of 5 $g \cdot L^{-1}$ with SAR below 10 $(mmol \cdot L^{-1})^{1/2}$, can ensure cotton yield. These findings provide a theoretical basis and reference for the efficient use of brackish water in Xinjiang and other extreme arid regions.

Keywords: cotton; irrigation water; mineralization; sodium adsorption ratio; dry matter accumulation; yield; water use efficiency